

負性インピーダンス変換回路を用いたアンテナの小型化・ 広帯域化に関する研究

代表研究者 榊 原 久二男 名古屋工業大学助教授

共同研究者 藤 本 京 平 国際科学振興財団専任研究員筑波大学名誉教授

1 研究の目的

近年、ノートパソコンや PDA などの携帯端末に、無線LANや携帯電話等の回線を用いた通信機能、さらには、デジタルテレビや FM ラジオ等の放送受信機能が搭載されるようになってきており、これまで用いられていたアンテナと同等の性能を維持しながら、アンテナの小形化のニーズが益々大きくなってきている。

ところが一般に、アンテナは小形になるほど効率が低く、且つ、動作周波数帯域幅も狭くなる。現実には、小形アンテナ実用化のためには、小さい損失で、必要な帯域にわたる整合が要求されるが、高い効率と広帯域性を同時に満足させるのは困難であり、そこには物理的限界があるとされている。そこで、新しい考えとして、負性インピーダンス変換回路 (NIC: Negative Impedance Converter) をアンテナの整合回路へ適用することを提案する。これができるれば、放射インピーダンスの負性変換により、効率的な整合、更に利得、帯域の向上などが可能となり、今までに無いアンテナの小形化、広帯域化などが実現できると考えられる。

NIC 回路を実現する上で、周波数は非常に重要なパラメータである。これまでに、オペアンプを高周波で用いた例はない。本研究では、アクティブ素子から構成される NIC 回路を用いて、アンテナの小型化、高性能化を実現することを目標とする。まずアンテナへ適用することを前提とした基礎検討として、オペアンプからなる NIC 回路の高周波特性について解析することを本研究の目的とする。

第2.1節で、NIC 回路の動作原理について説明し、2.2節で、発振することなく安定して動作するための動作条件について明らかにする。第3.1節で、NIC 回路の基本動作を、高周波での実験結果により実証し、さらに配線パターンの工夫により、動作周波数帯が高い周波数まで拡張された結果を示す。第3.2節で、高 S/N 比実現のため、コンデンサを使った NIC の特性の実験結果を示す。第4章で、NIC 回路をアンテナへ適用したときの問題点を明らかにする。

2 負性インピーダンス変換回路の回路構成と動作原理

2.1 動作原理

本研究で用いた NIC の構成とその動作原理について述べる。図1に NIC の回路構成を示す。オペアンプを理想のものと考え、入力インピーダンスと電圧利得は無限大、出力インピーダンスはゼロとする。よってオペアンプの出力電圧は

$$e_o = \mu(e_1 - e_2) \quad (1)$$

となる。 μ は、オペアンプの電圧利得を表している。

オペアンプの入力インピーダンスは無限大であるため、オペアンプの入力端子には電流は流れない。そのため

$$\begin{cases} i_1 = (e_1 - e_o) / Z_1 \\ i_2 = (e_o - e_2) / Z_2 \end{cases} \quad (2)$$

となる。式(1)の μ は無限大であるため $e_o \gg e_1, e_2$ となる。

よって、式(2)は

$$\begin{cases} i_1 \simeq -\frac{e_o}{Z_1} \\ i_2 \simeq \frac{e_o}{Z_2} \end{cases} \quad (3)$$

のように近似できる。よって式(3)より

$$i_2 = -\frac{Z_1}{Z_2} i_1 \quad (4)$$

となる。次に、オペアンプを理想のものとしているため、オペアンプの入力端では仮想接地としてみなせる。よって

$$e_1 = e_2 \quad (5)$$

となる。ここで式(4), (5)を F マトリックスで表すと

$$\begin{bmatrix} e_1 \\ i_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -Z_2/Z_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_2 \\ i_2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

となる。端子 2-2' に負荷インピーダンス Z_L を接続した場合の入力インピーダンス Z_i は

$$Z_i = \frac{e_1}{i_1} = -\frac{Z_1}{Z_2} Z_L \quad (7)$$

となり、 Z_L のインピーダンスの符号を反転したインピーダンスが、入力端において観測されることがわかる。

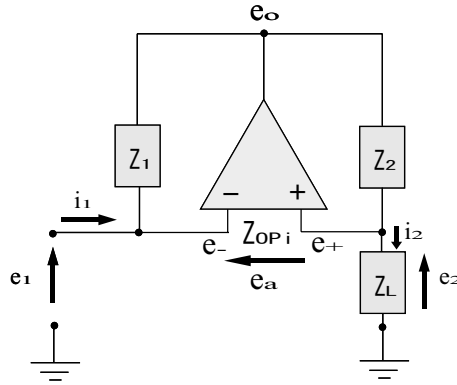


図1 負性インピーダンス変換回路

2.2 負性インピーダンス変換回路の動作条件

オペアンプの極性は、回路の安定条件により決まる。本来、オペアンプを安定に動作させるには、負帰還が掛かっていないと回路が正常に動作せず安定した特性が得られない。よってオペアンプの極性によって、接続すべき素子のインピーダンス値が異なってくる。電源の内部抵抗を Z_G とし、オペアンプの負荷側の端子をプラスに、電源側の端子をマイナスとしたときの、回路の安定条件を考える。負帰還を実現するために、以下の式を満たさなければならない。

$$e_- > e_+ \quad (8)$$

この場合、オペアンプの出力端には負の値の電圧がかけられ、その負の値の電圧が、オペアンプの入力端に帰還することで負帰還が成立する。ここで、オペアンプの入力端の電位は次式で表される。

$$e_- = \frac{Z_G}{Z_1 + Z_G} e_o \quad (9)$$

$$e_+ = \frac{Z_L}{Z_2 + Z_L} e_o \quad (10)$$

よって式(8), (9), (10)より安定条件は

$$Z_G > \frac{Z_1}{Z_2} Z_L \quad (11)$$

となる。オペアンプの極性が上記と逆の場合も同様にして求めると、

$$Z_G < \frac{Z_1}{Z_2} Z_L \quad (12)$$

となる。よって、負性インピーダンスとしてアンテナを接続する場合、アンテナのインピーダンスに応じて、式(11), (12)を満足する Z_1 , Z_2 を選ぶ必要がある。

前述において、オペアンプが理想の場合における NIC の入力インピーダンスの式を導出したが、市販のオペアンプは入力インピーダンスと電圧利得は有限で、出力インピーダンスはゼロより大きな値である。ここでは、これらのパラメータの理想値とのずれを考慮した場合の動作条件について説明する。但し、オペアンプの出力インピーダンスが、NIC の入力インピーダンスに及ぼす影響は少ないため、ここでは出力インピーダンスは式の要素としては考慮していない。市販のオペアンプでの NIC の動作条件について図1を用いると以下の式が考えられる。ここでオペアンプの電圧利得を μ とし、 Z_{OPi} はオペアンプの入力インピーダンスを表している。

$$e_1 = e_2 + e_a \quad (13)$$

$$i_1 = \frac{e_2 + e_a - e_o}{Z_1} + \frac{e_a}{Z_{OPi}} \quad (14)$$

$$\frac{e_o - e_2}{Z_2} + \frac{e_a}{Z_{OPi}} - \frac{e_2}{Z_L} = 0 \quad (15)$$

$$e_o = -\mu e_a \quad (16)$$

式(16)を式(14), 式(15)に代入すると

$$i_1 = \frac{e_2}{Z_1} + \left(\frac{1+\mu}{Z_1} + \frac{1}{Z_{OPi}} \right) e_a \quad (17)$$

$$\left(\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_L} \right) e_2 = \left(-\frac{\mu}{Z_2} + \frac{1}{Z_{OPi}} \right) e_a \quad (18)$$

となる。式(18)より

$$e_2 = \frac{Z_L(-\mu Z_{OPi} + Z_2)}{Z_{OPi}(Z_2 + Z_L)} e_a \quad (19)$$

となり、 e_1 は式(13)より次式となる。

$$e_1 = \frac{Z_L(-\mu Z_{OPi} + Z_2)}{Z_{OPi}(Z_2 + Z_L)} e_a + e_a \quad (20)$$

よって NIC の入力インピーダンス Z_i は

$$\begin{aligned} Z_i &= e_1 / i_1 \\ &= \frac{Z_L Z_{OPi} (1 - \mu) + Z_L Z_2 + Z_{OPi} Z_2}{Z_L Z_{OPi} + Z_L Z_2 + Z_{OPi} Z_2 + Z_1 Z_2 + Z_1 Z_L + \mu Z_{OPi} Z_2} Z_1 \end{aligned} \quad (21)$$

となる。例えば $Z_1 = Z_2 = Z_F$ の場合

$$Z_i = \frac{Z_L Z_{OPi} (1 - \mu) + (Z_L + Z_{OPi}) Z_F}{Z_L Z_{OPi} + (2Z_L + Z_{OPi}) Z_F + Z_F^2 + \mu Z_{OPi} Z_F} Z_F \quad (22)$$

と表せる。今、 $\mu > 0$ であるため $Z_i < 0$ となるには

$$(1 - \mu) Z_L Z_{OPi} < -(Z_L + Z_{OPi}) Z_F \quad (23)$$

$$\mu > \frac{Z_F}{Z_{OPi}} + \frac{Z_F}{Z_L} + 1 \quad (24)$$

である。よって上式が、負性抵抗となる条件となる。

しかし、図1のオペアンプの入力端子の極性が逆の場合は、オペアンプの利得 μ の極性が逆 ($\mu < 0$) になるため、式(22)より負性抵抗となる条件は

$$\mu Z_{OPi} Z_F > Z_L Z_{OPi} + (2Z_L + Z_{OPi}) Z_F + Z_F^2 \quad (25)$$

$$\mu > \frac{Z_L}{Z_F} + 2 \frac{Z_L}{Z_{OPi}} + \frac{Z_F}{Z_{OPi}} + 1 \quad (26)$$

となる。以上から、NIC の入力インピーダンスはオペアンプの電圧利得や入力インピーダンスに依存することがわかる。また、式(24)、(26)より NIC の入力インピーダンスが負性抵抗となるためには、式(24)の場合 $Z_{OPi} > Z_F$ 、 $Z_L > Z_F$ の関係となっていることが望ましい。さらに式(26)の場合 $Z_{OPi} > Z_F > Z_L$ の関係が望ましいといえる。以上より、NIC 回路により負性抵抗を実現する上で、必要とする条件が得られた。

3 試作回路の実回路構成と測定による基本動作の確認

3.1 試作 NIC の基本動作の実験的検証

理想オペアンプの特性としての、電圧利得無限大、入力インピーダンス無限大、出力インピーダンスゼロにおいて、NIC 回路が NIC として動作することを前節で示したが、実際にはこれらの値は有限である。そこで、NIC が動作するためのこれらの値の条件を回路シミュレータを用いて求めた。その結果、NIC として動作するためのオペアンプの特性として、電圧利得 40dB、入力インピーダンス 10Ω 以上、出力インピーダンス 1kΩ 以下が得られた。この条件をもとに多くの市販されているオペアンプの中から NIC を構成するに適しているものを選定した。本評価ではこれらの条件を広帯域に満たしている Analog Device 製の AD8099 を使用した。

負荷ポートに抵抗素子を接続し、NIC の動作を確認する。初めに NIC の配線パターンを図 2(a)に示す。負荷 Z_L には抵抗素子 100Ω を接続し、 Z_1 と Z_2 に等しい値のものを接続することで、回路の入力インピーダンスが -100Ω となるように設計する。しかし、ネットワークアナライザでは負の値の入力インピーダンスを測定することができないため、NIC に対して直列に抵抗素子 $Z_A = 330\Omega$ を接続し、入力インピーダンスが正の値 (230Ω) となるように、回路を構成した。次に、 Z_1 、 Z_2 のインピーダンス値を決める。オペアンプの電圧利得、入力インピーダンスは有限な値であることを考慮に入れ、回路シミュレータを用いて、これらの最適な値を求めたところ、100Ω の場合に、最も広帯域に NIC の特性を示した。よって、測定回路には 100Ω の抵抗素子を Z_1 、 Z_2 に接続した。基本構成の回路の写真を図 3(a)に示す。

さらに、回路の線路長が短いほど高周波特性が改善されることを示すために、回路の線路の長さをできるだけ短く設計し、図 2(a)の回路の特性と比較する。図 3(b)に回路の線路を短くした場合の写真を示す。基本構成での線路パターンを図 2(a)、配線パターンを短縮した構成での線路パターンを図 2(b)に示す。図 2(a)の基本構成は、表面のみに配線パターンを構成しており、オペアンプの周りを迂回する形になっていた。迂回する分、配線長が長くなっていた。しかし、図 2(b)では、スルーホールを用いることによって表面と裏面を電氣的に導通させ、表裏両面に配線パターンを構成した。そのため、オペアンプの背面に配線する構造となり、基本構成に比べ長さを短縮することができた。

次に、配線パターン長を短縮することによって、測定結果がどれだけ改善されたかを示すため、両回路の入力インピーダンスを測定した。測定結果を図 4 に示す。改善前の NIC については、回路の入力インピーダンスの実部、虚部とも、約 100MHz 付近まで測定結果が理想値に近い値が得られていることがわかる。これにより、NIC 回路の基本動作を確認した。一方、改善後の回路では、入力インピーダンスの実部、虚部とも約 150MHz

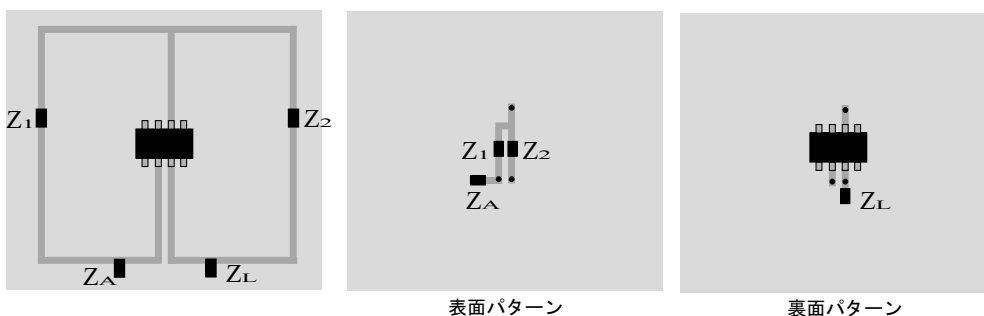


図 2(a) NIC の配線パターン (改善前)

図 2(b) NIC の配線パターン (改善前)

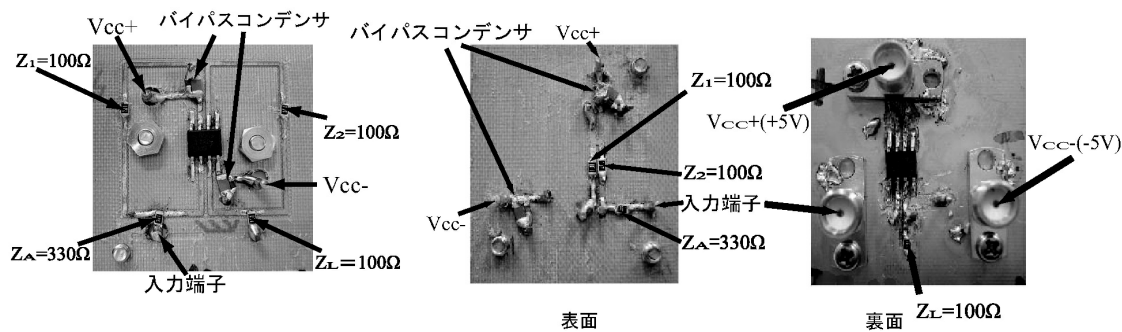


図 3(a) 試作した NIC 回路（改善前）

図 3(b) 試作した NIC 回路（改善後）

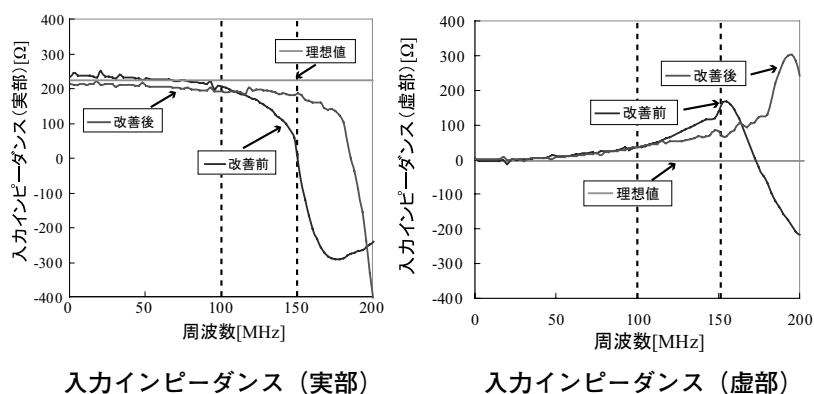


図 4 入力インピーダンスの周波数特性

まで理想値に近い値が得られており、改善前に比べ広帯域な特性が得られた。測定結果より、回路の線路の長さを短くすることで、空間から結合する高周波信号が低減されたため、より高い周波数での動作が実現できたと考えられる。以後示す測定回路の配線パターンは、改善後のパターンを用いている。

3.2 コンデンサーを用いた NIC

NIC をアンテナに適用し、受信系として使用する場合、 S/N 比の高い回路が必要となる。そこで、回路の損失と雑音レベルの低減を目的として、インピーダンス Z_1 , Z_2 に、熱雑音を発生させる抵抗素子を使用する代わりに、雑音を発生しないコンデンサを使用する。

Z_A , Z_L には、 100Ω の抵抗素子を接続した。前節の測定結果で約 100MHz 付近で NIC の動作を確認できたことから、前項の Z_1 , Z_2 が 100Ω の抵抗素子を用いた場合と等価となるように、約 100MHz でコンデンサの入ピーダンスが 100Ω となるように容量を設定した。このとき容量値は、

$$\left| \frac{1}{j\omega C} \right| = 100\Omega \quad (27)$$

$$C \simeq 10\text{pF} \quad (28)$$

となる。この回路構成で負性抵抗を測定した結果、NIC として正常に動作しなかった。この原因は、 Z_1 , Z_2 のコンデンサによって、オペアンプの入力端では直流的に電位が定まらなかったために、オペアンプにフィードバックできず、安定に動作しなかったと考えられる。この原因を取り除くため、図 5 のように回路構成を改善した。この構成では、以下の 3 つの工夫を加えた。

- ・入出力端にコンデンサ (C_i , C_o) を接続

2 つのコンデンサを入出力端に接続することによって、回路の外部から入力する信号の直流成分をカットでき、オペアンプをより安定に動作させることができる。高周波信号に影響を及ぼさないよう、2 つのコンデンサには十分大きい 4700pF を接続した。

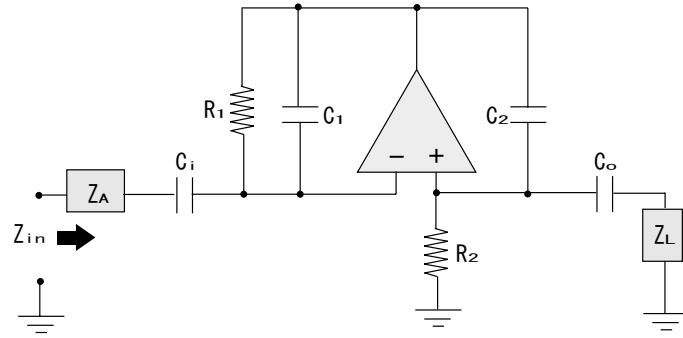


図5 コンデンサで構成された負性インピーダンス変換回路

・ C_1 に対して並列に R_1 の抵抗素子を接続

抵抗素子 R_A を接続することによって、直流的に安定し、オペアンプの動作点が定まり、オペアンプにフィードバックが安定的に加わる効果がある。その一方で、NIC のインピーダンス特性に影響しないように、大きい抵抗値である $R_1 = 100\text{ k}\Omega$ を使用した。

・ オペアンプのプラス入力端子に抵抗素子 R_2 を接続

R_2 の接続によって、プラス入力端子の直流電位を一定にした。この回路のオペアンプのプラス入力端子は、直流的には、線路がどこにも繋がっていない。そのため、 R_2 の電圧降下はなく、プラス入力端子がグランドとつながっている場合と等価となる。よって直流的にはプラス入力端子の電位がゼロとなる。高周波信号に対し影響が小さくなるように、 R_2 の値も大きい抵抗値 $100\text{ k}\Omega$ を使用した。

コンデンサを用いて NIC を構成したときのインピーダンス特性の測定結果を、図6に示す。リップルはのっているものの、約 100 MHz 程度まで、負性抵抗が確認された。特性改善のために抵抗素子を加えたが、電位を安定させるためのものであり、電流はほとんど流れないため、損失、雑音の増加は極めて小さいと考えられる。

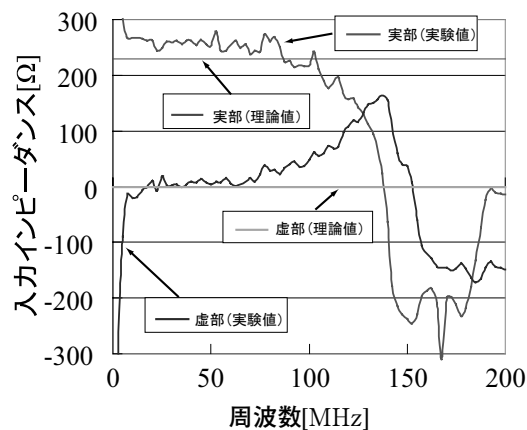


図6 コンデンサで構成された負性インピーダンス変換回路のインピーダンスの周波数特性

4 アンテナ適用上の問題点と今後の取り組み

NIC をアンテナへ適用したときの有効性を確認するために、4分の1波長モノポールアンテナを NIC に接続したところ、負性抵抗が観測されなかった。その原因を調査するため、アンテナを集中定数回路で模擬した抵抗とコンデンサの直列回路を NIC に接続したところ、アンテナを接続したときと同様の現象が見られた。このことから、負荷にキャパシタンス素子がつながっているために、位相回転が生じ、フィードバックがかからなくなってしまったものと考えられる。以上の結果より、今後の取り組みとして、以下の方法を検討中である。

1. 負荷素子のインピーダンスに応じた NIC 回路の設計
2. オペアンプよりも設計自由度の高いトランジスタ回路による NIC の実現

以上の2点を考慮してNICの開発を進め、アンテナへの適用をめざす。

5 まとめ

本研究では携帯機器の小型化，広帯域化を目的として，NIC とアンテナの一体化について検討した。これまでNIC は高周波帯で使用されることがなかったが，本論文では，オペアンプを使用してNIC を構成し，負荷に抵抗素子を接続した場合について，約 150MHz まで負性抵抗を確認した。また，損失低減を目的として，コンデンサを使用してNIC を構成した場合にも，負性抵抗を確認することができた。その一方で，NIC をアンテナに適用させた場合，NIC は正常に動作せず，負性抵抗の特性を観測することができなかった。しかし，その後の検討により，NIC が正常に動作しなかった理由として，アンテナが持つリアクタンス成分の周波数特性が原因であると考えられるため，周波数特性を持つ負荷に対してもNIC を動作させることが，今後の課題である。さらに，オペアンプよりも設計自由度が高く，高周波特性の優れたトランジスタを使用してNIC を構成することで，より高周波で動作するNIC を開発することへ本研究を発展させる予定である。

〈発 表 資 料〉

題 名	掲 載 誌 ・ 学 会 名 等	発 表 年 月
アンテナとの一体化を目的とした負性インピーダンス変換回路の高周波特性	平成16年度電気関係学会東海支部連合大会，0-248	2004年9月